

基于 GFRP-OFBG 筋的桥梁缆索索力测量技术研究

邓年春^{1,2}, 岑晓鹏³, 孙利民², 龙 跃¹

(1. 柳州欧维姆机械股份有限公司, 广西 柳州 545005; 2. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092;

3. 广西工学院 土木建筑工程系, 广西 柳州 545006)

摘要:基于内嵌光纤 Bragg 光栅传感器的光纤光栅-玻璃纤维增强塑料复合筋(GFRP-OFBG 筋),研究了 GFRP-OFBG 筋自身的应变和温度传感特性,研究结果表明,GFRP-OFBG 智能筋具有优异的线性传感性能,筋中光栅测量的应变极限达 12 000 $\mu\epsilon$ 以上,波长变化达 14 nm;对于用 GFRP-OFBG 筋替换普通钢绞线的中丝而得到的 GFRP-OFBG 智能钢绞线,进行了应变传感、温度敏感和钢绞线松弛试验,试验结果表明,GFRP-OFBG 智能钢绞线具有优异的线性传感性能和较低的应力松弛率,并可实现钢绞线受载全过程监测,绞线中光栅测量应变极限为 11 568.2 $\mu\epsilon$,光栅波长变化为 15.966 nm;对直接增加 GFRP-OFBG 筋制成的光纤光栅平行钢丝智能索和直接增加 GFRP-OFBG 智能钢绞线得到的光纤光栅平行钢绞线智能索,进行荷载传感试验,试验结果表明,智能索的感知线性度和重复性都比较好,并可监测 70% 以上公称破断索力。智能索工程应用案例表明,GFRP-OFBG 筋智能拉索在实际工程中很容易得到车辆荷载下的响应曲线。

关键词:索力测量;光纤光栅传感器;GFRP-OFBG 筋;钢绞线;平行钢丝拉索;平行钢绞线拉索

中图分类号:U446 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2010)02-0081-07

0 引言

桥梁缆索是缆索支承桥梁的核心构件,桥梁施工阶段及运营过程中都需要对缆索索力进行准确测量,以便实施监控或了解缆索的工作状态。在建设过程中采用千斤顶拉拔法或测力传感器法,比较容易得到准确的索力,但桥梁经过一段运营期后,如需要得到较准确的索力,目前实现比较困难,传统的传感测量方法都存在某方面不足,有的传感器难以满足长期测量的要求,有的测量方法受自身测量原理限制测量误差比较大。另外,目前的缆索索力测量方法几乎都是静态测量法或准静态测量法,而缆索的动态疲劳问题正日益受到重视,因此很有必要也很迫切需要发展新的缆索索力测量方法。

光纤光栅传感器(Optical Fiber Bragg Grating,简称 OFBG)是在光纤纤芯一小段范围内,采用紫外光对光纤侧面进行曝光或其它写入方法,使该段范围内的折射率沿光纤轴线发生周期性变化,通过周期性变化栅格的反射波长的移动来感应外界物理量的微小变化,测量具有抗电磁干扰能力强、尺寸小、线性度高、重复性好、抗腐蚀、绝对测量且响应速度快等优点^[1],被认为是结构健康监测的理想传感元件。但由于它的主要成分是二氧化硅,抗剪力差,相对于粗放式土木工程施工而言很容易损坏。另外,普通光纤光栅的测量量程为 $\pm 3\ 000\ \mu\epsilon$,相对于工作期间处于大应力应变状态的桥梁缆索而言,普通光纤光栅难以满足应用要求。

文献[2]提出在纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Polymer,简称 FRP)筋的制备过程中,沿筋长度方向埋入光纤 Bragg 光栅传感器,可制成光纤光栅-纤维增强塑料复合筋(FRP-OFBG 筋)。FRP-OFBG 筋不仅几乎没有改变 FRP 筋的力学性能,还具有线性、重复性好的传感性能,使含光栅的光纤得到很好保护,

收稿日期:2010-04-15

作者简介:邓年春,男,1975 年出生,博士,高级工程师。研究方向:预应力技术;工程结构健康诊断与维修加固。主持或主要参与省部级课题 10 余项,其中主持的科研项目获柳州市科技进步二等奖 1 项,发表文章 30 余篇,其中 EI 检索 7 篇。

基金项目:上海市博士后科研资助计划资助及广西区科学研究与技术开发计划项目资助

同时提高了光纤光栅的测量量程,测量拉伸最大应变达 $10\,000\ \mu\epsilon$ 以上^[34]。现基于光纤光栅-玻璃纤维增强塑料复合筋(GFRP-OFBG 筋),研究传感器在缆索中的布设方法、缆索安装传感器后的自传感特能以及工程应用情况。

1 GFRP-OFBG 筋性能试验研究

在 GFRP 筋的生产过程中,将写入光栅的光纤和纤维束同时牵引入拉挤模,并使光纤居于合束盘正中孔,通过拉挤模过程中,树脂受热固化而将纤维束和含传感器的光纤一起复合制成 GFRP-OFBG 筋。由于光纤直径很小,约为 $125\ \mu\text{m}$,且其涂覆层为聚合物,所以光纤与 GFRP 复合物具有相容性,几乎不会改变 GFRP 筋本身的材料力学性能^[3]。

1.1 应变传感性能

为了研究 GFRP-OFBG 筋的拉伸应变传感特性和最大拉伸应变测量极限,在柳州欧维姆机械股份有限公司试验室内的锚具静载试验台架上进行了多次重复加载和卸载试验。试验台架总长 $3\ \text{m}$,试验设备包括 $300\ \text{kN}$ 应变测力传感器及配套读数仪、千斤顶和油泵张拉设备、DH3817 动静态应变测试系统、MOI-sm125 光纤光栅解调仪和温度计等。测试试样为 2 根 $4.5\ \text{m}$ 长直径为 $\Phi 5\ \text{mm}$ 的 GFRP-OFBG 筋。为了便于对 GFRP-OFBG 筋进行加载,在筋两端各 $500\ \text{mm}$ 范围内,用 $7\Phi 15.2\ \text{mm}$ 钢绞线抽出中丝后剩下的 6 根边丝,与其进行复合扭绞。为了增加 GFRP-OFBG 筋与钢丝之间的粘结效果,GFRP-OFBG 筋外表涂环氧树脂。每根筋含 1 个光纤光栅位于仅有 GFRP-OFBG 材料段的中间。为了测试 GFRP-OFBG 筋的应变,在 GFRP-OFBG 筋的外表面光栅所处的位置粘贴电阻应变片,并制作补偿片,采用半桥进行测量。张拉加载时两端锚固方式采用 15.2 钢绞线普通夹片锚固夹持。

试验加载采用分级张拉,先将荷载分 4 级,重复加卸载试验 3 次,最大荷载为产生 $6\,000\ \mu\epsilon$ 左右应变的荷载值($6.5\ \text{kN}$ 左右),第 4 次加载待达到 $6\,000$ 应变后,缩小荷载级差,直接加载至筋中光栅读数消失。第 1 根 GFRP-OFBG 筋 4 次加卸载的测试结果见图 1 和图 2,其中图 1 为光栅的中心波长与电阻应变片的测量结果的关系曲线。图 2 是光栅的中心波长与加载荷载的关系曲线。筋直到破断时,光纤光栅读数才消失,此时应变极限为 $12\,369.1\ \mu\epsilon$,波长变化 $14.629\ \text{nm}$ 。第 2 根 GFRP-OFBG 筋的测试,采用与第 1 根筋相同的方法进行,试验结果表明,此根筋中光栅测量的极限应变为 $14\,249.2\ \mu\epsilon$,波长变化 $17.959\ \text{nm}$ 。从 2 根 GFRP-OFBG 筋的试验结果可知,GFRP-OFBG 智能筋具有优异的线性应变传感性能,GFRP-OFBG 筋中光栅测量的极限应变达 $12\,000\ \mu\epsilon$ 以上,波长变化达 $14\ \text{nm}$ 。

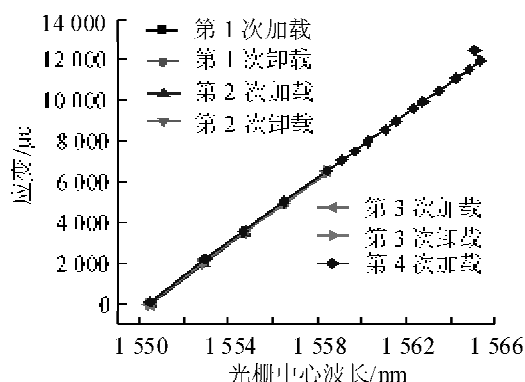


图 1 第 1 根 GFRP-OFBG 筋波长与应变关系

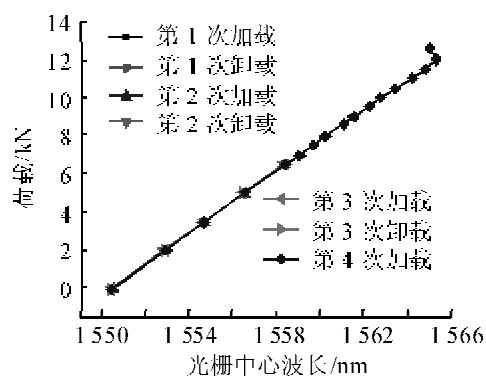


图 2 第 1 根 GFRP-OFBG 筋波长与荷载关系

1.2 温度敏感性能

为了研究温度对 GFRP-OFBG 筋中光栅传感器性能的影响,以便进行应变测量过程中的温度补偿,将 1 根 $\Phi 5\ \text{mm}$ GFRP-OFBG 筋放入自制的恒温装置内进行温敏试验(恒温精度为 $\pm 0.5\ ^\circ\text{C}$),装置包括自动恒温加载装置、标准铂金温度传感器、具有隔热功能的双层塑料恒温管、热风机与塑料管之间的送风管,为了保持塑料管的两端密封,采用布条塞紧堵塞。试验方法为从室温开始,每级 $5\ ^\circ\text{C}$,逐级加载至 $50\ ^\circ\text{C}$,待

温度稳定 1 h 后,测读光纤光栅读数。GFRP-OFBG 筋的温敏性能曲线见图 3。利用拟合法求温敏系数,试验结果表明, $\Phi 5$ mm GFRP-OFBG 筋的温度传感灵敏度系数为 $19.8 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

2 光纤光栅智能钢绞线研制及试验研究

2.1 制作工艺

用合适直径的 GFRP-OFBG 筋替换普通钢绞线的中丝可得到一种新型智能钢绞线,全部采用该种钢绞线或与其它普通钢绞线混用,利用等应变原理,可实现测量目的。用 GFRP-OFBG 筋替换 7 丝钢绞线的中丝得到的智能钢绞线,见图 4 所示,GFRP-OFBG 筋位于光纤光栅智能钢绞线截面的正中位置。为了保证 GFRP-OFBG 筋与钢丝的粘结效果,保持同步变形,在智能筋的表面可增加喷涂环氧树脂等粘结剂。智能钢绞线的制作过程为:(1)普通钢绞线和 GFRP-OFBG 筋同时下料,为了方便接信号传输光纤而不进行二次裁剪钢绞线,要求 GFRP-OFBG 筋的下料长度比钢绞线长 $5 \sim 10 \text{ cm}$;(2)将普通钢绞线打散,并移除中丝;(3)用清洗液清洗 GFRP-OFBG 筋和钢绞线边丝的表面,去除杂质;(4)以 GFRP-OFBG 筋为中心丝,重新恢复成钢绞线,捻制过程中在中丝与各侧丝之间全长涂抹粘结剂;(5)为了使 GFRP-OFBG 筋与钢丝充分粘结,智能

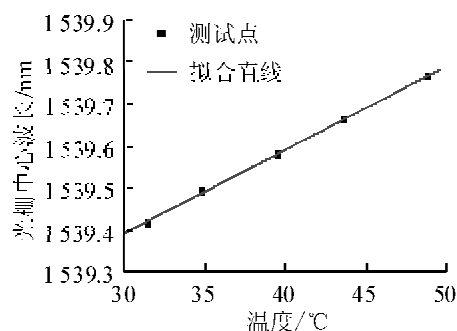


图3 GFRP-OFBG 筋温度敏感性能

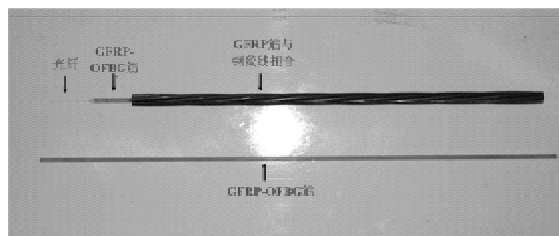


图4 GFRP-OFBG 筋及智能钢绞线

钢绞线养护一定时间;(6)对智能钢绞线的中丝 GFRP-OFBG 筋,安装光纤光栅接头或直接焊接传输光缆。

2.2 应变传感试验

为了研究新型智能钢绞线的应力应变传感特性,将 4.5 m 长的新型智能钢绞线在 3 m 长的锚具静载试验台座上进行拉伸试验。试验过程中,采用普通钢绞线夹片夹持钢绞线,光栅解调采用 MOI-sm125 光栅解调仪。为了得到钢绞线的直观应变,顺钢丝方向粘贴了电阻应变片。试验加载过程为:先施加 50% 智能绞线的公称破坏强度(不计 GFRP-OFBG 筋的强度贡献)进行预张拉 3 次,然后退回到钢绞线预紧状态,再由预紧状态开始,每级 22 kN ,逐级加载至 110 kN (约 0.5 倍不计 GFRP-OFBG 筋贡献的钢绞线公称破坏强度值),重复加卸载 4 次,然后退回到钢绞线预紧状态,最后再进行逐级张拉,直到钢绞线破坏,并记录光栅无读数时荷载值。

智能钢绞线的应变,根据钢绞线边钢丝与钢绞线纵向的角度差异,将电阻应变片的测量结果,乘 1.022 6 的系数进行修正得到^[46]。将 5 次加卸载的试验结果绘制成曲线,智能钢绞线的光栅波长与荷载的关系曲线见图 5,光栅波长与应变的关系曲线见图 6。直到钢绞线破断时,光栅读数才消失,此时极限荷载为 220.0 kN ,由此可知 GFRP-OFBG 筋可对钢绞线整个加载过程实现监测,最大应变为 $11568.2 \mu\epsilon$,光栅波长变化 15.966 nm 。因此,GFRP-OFBG 智能钢绞线的应变传感线性度和重复性都比较好,并可实现钢绞线受载全过程监测。

2.3 温敏试验

为了研究温度对智能绞线中光栅传感器性能的影响,以便进行应变测量过程中的温度补偿。将 2 根 GFRP-OFBG 钢绞线一起放入自制的恒温装置内进行温敏试验。试验结果表明,第 1 根 GFRP-OFBG 钢绞线的温度传感灵敏度系数为 $22.5 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,第 2 根 GFRP-OFBG 钢绞线的温度传感灵敏度系数为 $21.5 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,2 根 GFRP-FBG 筋钢绞线对温度有较好的线性传感性能,其温敏系数与 GFRP-OFBG 筋的 $19.8 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 相差不大。

2.4 应力松弛试验

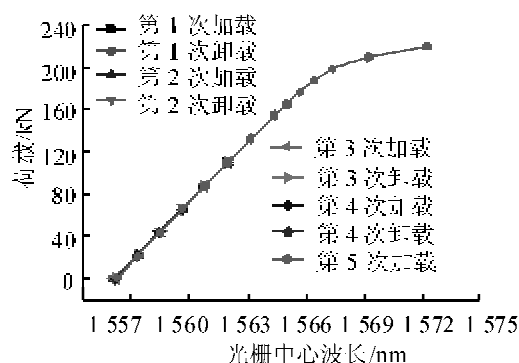


图5 GFRP-OFBG 智能钢绞线 5 次加卸载
光栅波长与荷载的关系曲线

高强钢丝和钢绞线存在应力松弛, GFRP-OFBG 智能钢绞线受荷载作用时, GFRP-OFBG 筋的感知性能自然受应力松弛影响。为了研究应力松弛对 GFRP-OFBG 钢绞线自感知性能的影响, 在欧维姆公司的钢绞线松弛试验机上对 1 根由 $\Phi 15.2$ mm 的钢绞线替换中丝得到的 GFRP-OFBG 智能钢绞线进行应力松弛试验。试验前后采用在同一温度环境和同样测试方法的条件下, 测试 GFRP-OFBG 智能钢绞线的应变传感特性, 对比分析应力松弛对智能钢绞线的应力传感测量的影响。试验方法和过程参考国家标准 GB/T5224—2003《预应力混凝土用钢绞线》和 GB/T10120—1996《金属应力松弛试验方法》。根据钢绞线 II 松弛标准, 在 70% 公称最大负荷情况下, 将 GFRP-OFBG 智能钢绞线的应力松弛试验进行了 100 h, 试验结果表明智能绞线的松弛率为 1.09%, 由 100 h 推算 1 000 h 的松弛率为 1.572%。100 h 松弛试验前后 GFRP-OFBG 智能钢绞线的测试曲线对比, 见图 7。用直线方程 $Y = A + BX$ 拟合智能钢绞线松弛试验前后的荷载波长数据, 试验前方程系数 $A = -31\,147.8$, $B = 20.36$, 试验后拟合系数 $A = -31\,475.8$, $B = 20.57$, 试验前后系数 A 值增加 1.05%, B 值增加 1.03%, 与 GFRP-OFBG 智能钢绞线的松弛率基本相等。因此钢绞线松弛对测试产生影响, 影响大小基本与钢绞线松弛率基本一致。

3 光纤光栅平行钢丝智能拉索

在平行钢丝拉索的索体加工成型时, 将预先制备好与钢丝相同直径, 并与钢丝等长的 GFRP-OFBG 智能应变传感筋, 放入索体中, 一起与其它钢丝扭绞成形, 然后挤 HDPE 包裹, 最后安装冷铸锚头锚锚具。利用锚具内的环氧砂浆固定 GFRP-OFBG 筋的两端, 光纤传输线从拉索锚具内的尾端出来。索力作用时, 智能筋与钢丝同步变形, 利用光纤光栅传感器, 感知拉索的应变, 进而得出拉索应力及索力^[7]。

在欧维姆公司下属的缆索分公司, 制作了 4 根约 4.5 m 长的 85 丝平行钢丝冷铸锚头锚智能索, 索中采用前述直接增加 GFRP-OFBG 智能传感筋的办法。4 根索体中, 1[#]索和 2[#]索在周边分别布设 1 根直径为 7 mm 的智能筋, 每根智能筋中嵌入了 2 个光栅, 另外索中各布设了 1 根 GFRP-OFBG 温度补偿筋; 3[#]索和 4[#]索, 在索体内周边均匀布设 2 根直径为 7 mm 的智能筋。每根智能筋中嵌入了 1 个光纤光栅。智能索的荷载传感试验在欧维姆公司的试验室内 12 000 kN 拉索静载试验台架上进行。试验装置包括油泵及千斤顶、CL-YB-12 MN 型锚固力传感器、位移传感器、SI425 光栅调解仪。加载过程为, 首先加载至 0.4 倍公称破断索力 P_b 进行预张拉, 然后卸载至 0.01 P_b ; 由 0.01 P_b 开始, 每级 0.06 P_b , 加载速度不大于 100 MPa/

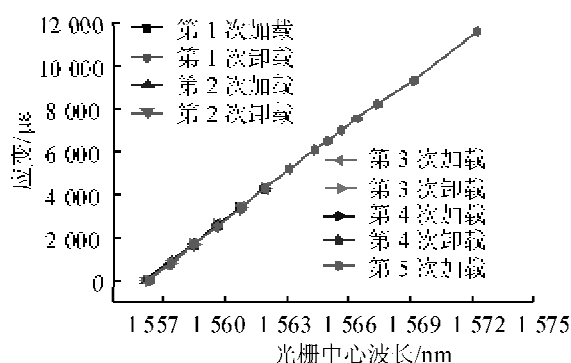


图6 GFRP-OFBG 智能钢绞线 5 次加卸载
光栅波长与应变的关系曲线

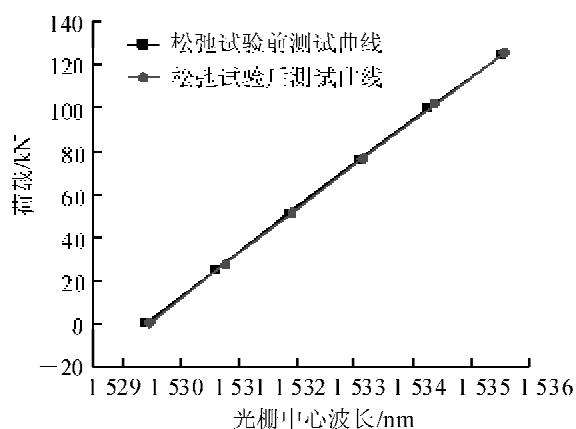


图7 100 h 松弛试验前后 GFRP-OFBG 智能
钢绞线测试曲线对比

min,持荷 5 min 后记录光栅读数和索长的变化,逐级加载至 $0.4 P_b$,持荷 10 min 后,卸载至 $0.01 P_b$,重复加载卸载 2 次;第 3 次加载先如前分级加载至 $0.4 P_b$,此后每级 $0.03 P_b$,逐级加载直到所有的光栅读数消失。

通过千斤顶与张拉台座之间的锚固力传感器测出的索力,除以拉索公称面积得出钢丝应力。 $1^{\#}$ 索中光栅的光栅中心波长与拉索应力关系见图 8 和图 9。从图中可以看出,光栅传感器的中心波长与锚固力传感器测出的应力之间的线性关系比较好,重复性也非常好,完全能满足传感要求。4 根平行钢丝智能索的测试结果见表 1。平行钢丝拉索的极限应力为 1 670 MPa,从表 1 可知,GFRP-OFBG 筋监测拉索的应力可达到 70% 到 85% 倍公称破断索力,应变达 10 000 $\mu\epsilon$ 。

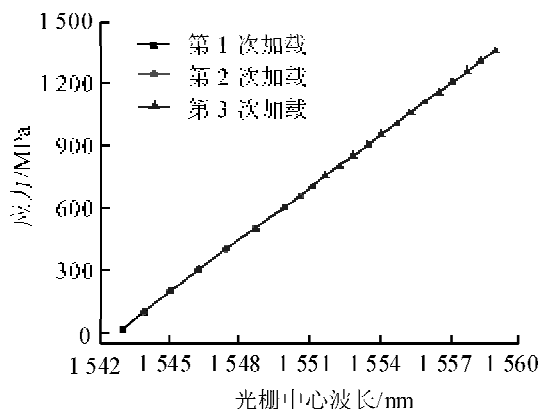
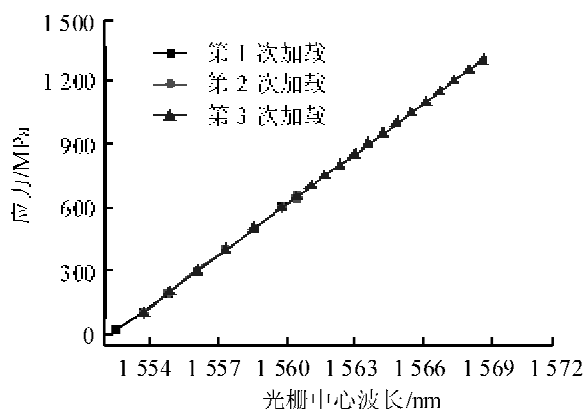
图8 $1^{\#}$ 索中 $1^{\#}$ 光栅波长与应力关系图9 $1^{\#}$ 索中 $2^{\#}$ 光栅波长与应力关系

表1 平行钢丝智能索测试结果

光栅号	1 [#] 拉索		2 [#] 拉索		3 [#] 拉索		4 [#] 拉索	
	1 [#] 智能筋 光栅1	1 [#] 智能筋 光栅2	1 [#] 智能筋 光栅1	1 [#] 智能筋 光栅2	1 [#] 智能筋 光栅1	2 [#] 智能筋 光栅1	1 [#] 智能筋 光栅1	2 [#] 智能筋 光栅1
光栅监测应力/MPa	1 350	1 300	1 350	1 350	1 350	1 450	1 250	1 250
传感器极限应变/ $\mu\epsilon$	11 050	11 000	10 631	10 630	10 542	11 242	10 112	10 012

4 光纤光栅平行钢绞线智能拉索

钢绞线拉索主要包括索体和锚具两大部件,一般情况下它的索体和锚具在工厂制作好后,不进行安装。运往工地进行穿索、装锚、张拉后再进行锚固。工厂内预制好 PE 护套管、钢绞线和锚具,分开运往工地,现场采用单根挂索逐根张拉,组装成平行钢绞线拉索。采用 GFRP-OFBG 筋对平行钢绞线拉索进行测量,可采用直接增加光纤光栅智能钢绞线的办法,利用智能钢绞线与普通钢绞线的等应变原理进行测量^[7]。

测试试验在欧维姆公司试验室进行,拉索型号采用 7 根 4.5 m 长的 $\Phi 15.2$ 的钢绞线,索中放 1 根 GFRP-OFBG 钢绞线,筋中含 1 个光纤光栅传感器,光栅位于智能钢绞线的中部。为了进行对比在智能钢绞线的光栅位置同时粘贴了应变片,对钢绞线的应变进行测量。试验加载过程为:先将各根钢绞线进行单根预紧,然后加载至 0.5 倍公称破断索力 P_b 进行预张拉 3 次,然后加载速度不大于 100 MPa/min,逐级加载至 $0.5 P_b$,然后卸载至 $0.05 P_b$,持荷 5 min 后记录光栅读数和索长的变化,重复加载卸载 2 次;第 3 次由 $0.05 P_b$ 开始,逐级加载至所有的光栅读数消失。

GFRP-OFBG 钢绞线智能索进行 3 次重复加卸载试验,光栅波长与荷载以及光栅波长与电阻应变片测量得到的应变的关系曲线分别见图 10 和图 11。从图中可以看出,光栅中心波长与锚固力传感器测出的荷载之间的线性关系非常好,试验结果的重复性也非常好。第 3 次加载试验结果表明,光栅可对整个钢绞线索的受力过程进行监测,波长变化量程达 11.3 nm,最大应变达 9 141.1 $\mu\epsilon$ 。

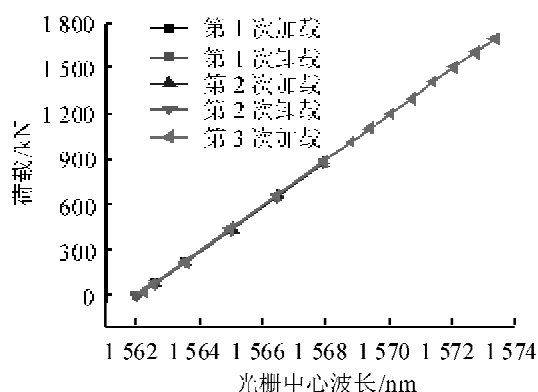


图 10 GFRP-OFBG 智能钢绞线智能索 3 次加卸载
光栅波长与荷载的关系曲线

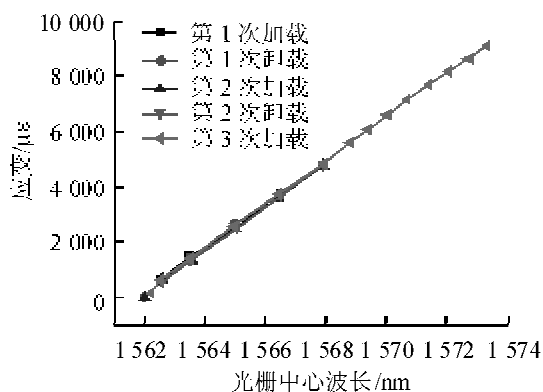


图 11 GFRP-OFBG 智能钢绞线智能索 3 次加卸载
光栅波长与应变的关系曲线

5 工程应用

天津永和桥为双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,全长 510 m,跨径布置为 25.15 m + 99.85 m + 260 m + 99.85 m + 25.15 m,全桥共 44 对拉索,拉索采用 $\Phi 5$ 平行高强钢丝冷铸镦头锚拉索。该桥于 1987 年建成通车,由于近几年超载车较多,该桥出现了不少病害。2007 年对该桥中跨跨中合龙段进行置换,对全桥斜拉索进行了更换。为提高桥梁的养护管理水平,保证桥梁安全运营,在大桥加固过程中安装了一套健康监测系统,其中部分斜拉索采用 GFRP-OFBG 智能平行钢丝拉索。每根智能索中,直接增加 2 根 $\Phi 5$ 的 GFRP-OFBG 应变筋,并且光纤光栅的尾纤从两端锚头底部出来。

桥梁拉索出厂时,需要进行超张拉检验。在拉索超张拉过程中,采用每年经过国家标定的锚固测力传感器作为标准传感器,进行光栅中心波长与加载荷载的关系标定。加载荷载除以公称面积,得到应力,由标定结果可得到光栅中心波长与应力的计算公式。温度标定系数,采用悬挂短索的方式进行测定。

桥梁加固后重新恢复了交通,智能拉索中的光纤光栅传感器记录了该桥在日常交通荷载下斜拉索的应变。图 12 和图 13 分别给出了 C1 和 C10 索在 2008 年 1 月 11 日 00:00 ~ 24:00 之间 24 h 内拉索应力时程曲线,采样频率为 62.5 Hz。由图可知,GFRP-OFBG 筋可实时地测量出拉索的动态响应。根据拉索时程响应曲线可进行索力状态、荷载效应和疲劳效应等方面进行分析,并综合评估拉索以及桥梁的安全^[8]。

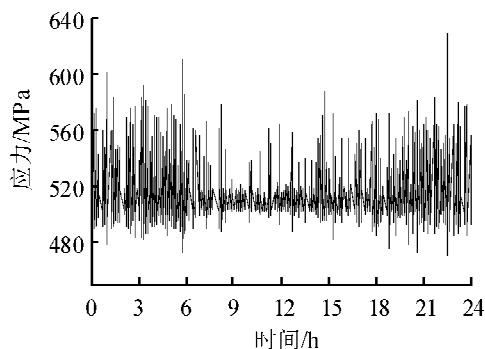


图 12 C1 智能索实测车辆荷载效应

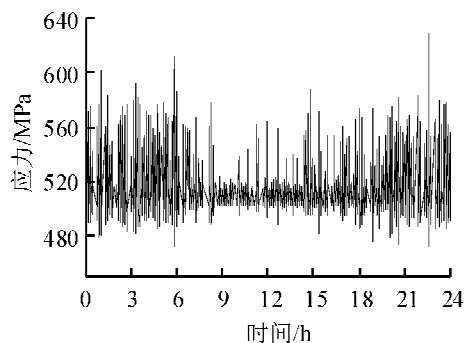


图 13 C10 智能索实测车辆荷载效应

6 结论

基于 GFRP-OFBG 智能筋,研究了智能筋自身、由 GFRP-OFBG 筋替换普通钢绞线的中丝而得到的 GFRP-OFBG 智能钢绞线、直接增加 GFRP-OFBG 筋制成的光纤光栅平行钢丝智能索、直接增加 GFRP-OFBG 智能钢绞线得到的光纤光栅平行钢绞线智能索等的传感特性,可得出如下结论:

(1) GFRP-OFBG 智能筋具有优异的线性传感性能, GFRP-OFBG 智能筋中光栅测量的极限应变达 12 000 $\mu\epsilon$ 以上, 波长变化达 14 nm。

(2) GFRP-OFBG 智能钢绞线, 具有优异的线性传感性能和较低的应力松弛率, 并可实现钢绞线受荷载作用的全过程监测。光栅最大应变为 11 568.2 $\mu\epsilon$, 光栅波长变化 15.966 nm。

(3) 对直接增加 GFRP-OFBG 筋制成的光纤光栅平行钢丝智能索和直接增加 GFRP-OFBG 智能钢绞线得到的平行钢绞线智能拉索, 进行了荷载传感试验, 结果表明, 智能索的感知线性度和重复性都比较好, 并可监测拉索 70% 以上的公称破断索力。

(4) GFRP-OFBG 筋智能拉索在实际工程中很容易得到拉索在车辆荷载下的动态响应曲线, 进行温度补偿后, 容易得到索力测量绝对值。

(5) GFRP-OFBG 筋和光纤光栅智能钢绞线的温敏系数呈线性。应力测量过程中的温度影响, 采用温度传感器测量出温度, 然后根据温敏系数, 利用系数法消除。

参 考 文 献

- [1] Todd M D, Johnson G A, Vohra S T. Deployment of a fiber Bragg grating-based measurement system in a structural health monitoring application[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10 (3): 534-544.
- [2] 欧进萍, 周智. 纤维增强塑料-光纤光栅复合筋: 中国, CN1484456A[P]. 2004-3-24.
- [3] 周智. 土木工程结构光纤光栅智能传感元件及其监测系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2003.
- [4] 邓年春. 新型桥梁拉索及其光纤光栅监测技术研究[R]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [5] 邓年春, 龙跃, 朱万旭, 等. 光纤光栅智能钢绞线: 中国, CN200997009[P]. 2006-12-29.
- [6] 邓年春, 欧进萍, 周智, 等. 光纤光栅在预应力钢绞线应力监测中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1550-1553.
- [7] 邓年春. 桥梁缆索索力测量传感器及测量系统研究[R]. 上海: 同济大学, 2010.
- [8] 兰成明. 平行钢丝斜拉索全寿命安全评定方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2009: 1-100.

Study on Cable Force Measurement Based on Smart GFRP-OFBG Bars

Deng Nianchun^{1,2}, Cen Xiaopeng³, Sun Limin², Long Yue¹

(1. Liuzhou OVM Machinery Co. Ltd, Liuzhou 545005, China;

2. College of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Civil and Architectural Engineering Department, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: Combining the strength properties of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) with the sensing properties of Optical Fiber Bragg Grating (OFBG), a new kind of smart GFRP-OFBG composite bars have been developed. The stress and temperature sensing properties of GFRP-OFBG bars are studied. The result shows that GFRP-OFBG bars are perfect sensors and the maximum tensile strain is up to 12 000 $\mu\epsilon$. The maximum range of wavelength shift for OFBG is up to 14 nm. The smart strand is made by GFRP-OFBG bar replacing the middle wire of normal strand. The sensing property test and stress relaxation test are carried out. The experimental results show that smart GFRP-OFBG strand has a good linear sensor performance and a low relaxation rate. OFBG sensor built in GFRP bar can monitor the whole load process. The maximum monitoring strain of OFBG is up to 11 568.2 $\mu\epsilon$ and the maximum range of wavelength shift for OFBG is up to 15.966 nm. The smart parallel wire cables and strand cables can be obtained by adding smart GFRP-OFBG bars or smart strands. The load sensing property is investigated. The experimental results show that the ultimate sensor range of GFRP-OFBG bars is up to 70% ultimate lengths of stay cable. Engineering application of smart cables shows that the load effect of stay cable can be obtained easily by GFRP-OFBG bar sensor.

Key words: cable force measurement; Optical Fiber Bragg grating (OFBG); GFRP-OFBG bar; steel strand; parallel wire cable; parallel strand cable